

# АНАЛИЗ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ Y-ЦИРКУЛЯТОРОВ НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

А.В. Сорокин

(г. Нижний Новгород, ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седатова», niis@niis.nnov.ru)

## THE ANALYSIS OF EQUIVALENT CIRCUITS OF Y-CIRCULATORS ON LUMPED ELEMENTS

A.V. Sorokin

В настоящем сообщении представлен анализ эквивалентных схем и условий циркуляции Y-циркуляторов на сосредоточенных элементах, выполненный при помощи методов теории цепей. Эквивалентная схема в виде «звезды» с согласующими цепями приведена на рисунке 1.

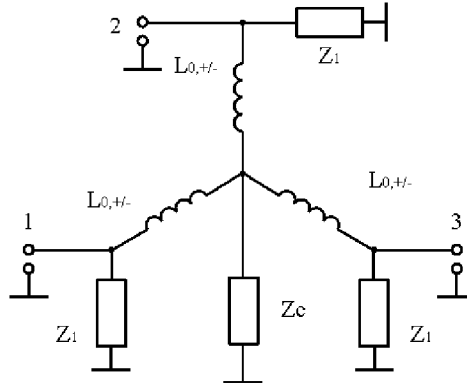


Рис. 1.

Собственные значения матрицы импеданса Y-сочленения  $Z_{0,+/-}$  связаны с собственными значениями матрицы рассеяния  $S_{0,+/-}$  соотношением (1)

$$Z_{0,+/-} = \rho_0 \frac{1 + S_{0,+/-}}{1 - S_{0,+/-}} = j\rho_0 \operatorname{ctg} \frac{\frac{2\pi}{3} + n\varphi}{2}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – фаза коэффициента прохождения сигнала с входа на выход,  $\rho_0$  – сопротивление подводящих линий,  $n=0;1;2$ .

Собственные значения матрицы импеданса Y-сочленения  $Z_{0,+/-}$  описываются выражениями (2) и (3)

$$Z_0 = j\omega L_0 = j\omega L\mu_{\perp}(1 - K_{св}) + j3Z_c = j3Z_c, \quad (2)$$

$$Z_{+/-} = j\omega L_{+/-} = j\omega L(\mu \pm \eta\kappa)(1 + \frac{K_{св}}{2}) = j\frac{3}{2}\omega L(\mu \pm \kappa), \quad (3)$$

где  $\mu$  и  $\kappa$  – взаимная и невязимная составляющие тензора магнитной проницаемости феррита  $\|\mu\|$ ,  $\mu_{\perp} = (\mu^2 - \kappa^2)/\mu$ ,  $\eta$  – невязимный фактор заполнения,  $K_{св}$  – коэффициент связи индуктивностей.

Введением невязимного фактора заполнения  $\eta$  и коэффициента связи индуктивностей  $K_{св}$  учитываются особенности конструкции Y-сочленения индуктивностей. Для упрощения расчётов будем рассматривать идеальный циркулятор, то есть  $\eta=1$  и  $K_{св}=1$ . При различных способах включения согласующих цепей  $Z_1$  и  $Z_c$ , реализуются условия циркуляции, отличающиеся значениями фазы коэффициента прохождения сигнала с входа на выход.

Рассмотрим условия циркуляции для характерных значений  $\varphi$ :

1.  $\varphi=\pi$  ( $Z_0 = 0$ ,  $Z_- = -Z_+ = j\sqrt{3}\rho_0$ ). Данные условия циркуляции реализуются включением параллельной ёмкости в каждое плечо циркулятора [1], а общая точка индуктивностей заземлена ( $Z_1 = 1/j\omega C$ ,  $Z_c = 0$ ), тогда условия циркуляции можно записать в виде

$$\omega L = -\sqrt{3}\rho_0 \frac{\kappa}{\mu}, \quad \omega^2 LC = 1. \quad (4)$$

2.  $\varphi=0,2\pi$  ( $Z_0 = \infty$ ,  $Z_+ = -Z_- = j\rho_0/\sqrt{3}$ ). Данные условия циркуляции реализуются, так же как и в предыдущем случае, включением параллельной ёмкости в каждое плечо циркулятора, а между общей точкой индуктивностей и корпусом включается параллельный контур ( $Z_1 = 1/j\omega C$ ,  $Z_c = \infty$ ), тогда условия циркуляции можно записать в виде

$$\omega L = -\frac{\sqrt{3}}{3} \rho_0 \frac{\kappa}{\mu}, \quad \omega^2 LC = 1. \quad (5)$$

Анализируя (4) и (5), можно сделать следующий вывод, что при одинаковых  $\omega$  индуктивность рамок при  $\varphi = \pi$  в три раза больше, чем при  $\varphi = 2\pi$ , а ёмкости  $C$  при  $\varphi = 2\pi$  в три раза больше, чем при  $\varphi = \pi$ . Для остальных значений  $\varphi$  значения индуктивности и ёмкости принимают промежуточные значения.

3.  $\varphi=2\pi/3$  ( $Z_- = \infty$ ,  $Z_0 = -Z_+ = j\rho_0/\sqrt{3}$ ). Данные условия циркуляции реализуются включением параллельной ёмкости в каждое плечо циркулятора, а между общей точкой индуктивностей и корпусом включается индуктивность ( $Z_1 = 1/j\omega C$ ,  $Z_c = j\omega L_c$ ), тогда условия циркуляции можно записать в виде

$$\omega L = -\frac{2\sqrt{3}}{3} \rho_0 \frac{\kappa}{\mu}, \quad \omega^2 LC = 1 - \frac{\kappa}{\mu}, \quad \omega L_c = j \frac{\rho_0}{3\sqrt{3}}.$$

4.  $\varphi=4\pi/3$  ( $Z_+ = \infty$ ,  $Z_- = -Z_0 = j\rho_0/\sqrt{3}$ ). Данные условия циркуляции реализуются включением параллельной ёмкости в каждое плечо циркулятора, а между общей точкой индуктивностей и корпусом так же включается ёмкость ( $Z_1 = 1/j\omega C$ ,  $Z_c = 1/j\omega C_c$ ), тогда условия циркуляции можно записать в виде

$$\omega L = -\frac{2\sqrt{3}}{3} \rho_0 \frac{\kappa}{\mu}, \quad \omega^2 LC = 1 + \frac{\kappa}{\mu}, \quad \omega L_c = j \frac{3\sqrt{3}}{\rho_0}.$$

5.  $\varphi=\pi/3$  ( $Z_+ = 0$ ,  $Z_0 = -Z_- = j\sqrt{3}\rho_0$ ). Данные условия циркуляции реализуются включением параллельной и последовательной ёмкостей в каждое плечо циркулятора, а между общей точкой индуктивностей и корпусом индуктивности.
6.  $\varphi=5\pi/3$  ( $Z_- = 0$ ,  $Z_+ = -Z_0 = j\sqrt{3}\rho_0$ ). Данные условия циркуляции реализуются включением параллельной ёмкости и последовательной индуктивности в каждое плечо циркулятора и ёмкости между общей точкой индуктивностей и корпусом.

Варианты 5 и 6 требуют сложных согласующих цепей и на практике не используются, так как требуют сложных, по сравнению с вариантами 1–4, согласующих цепей и не имеют никаких преимуществ перед другими вариантами. В узкополосных циркуляторах в основном используется вариант 1 ( $\varphi=\pi$ ), как имеющий минимум элементов, и, соответственно, более простую конструкцию. В ряде случаев в сложных радиотехнических системах возникает необходимость обеспечения гальванической развязки узлов от «корпуса», что может быть достигнуто использованием циркуляторов с  $\varphi=4\pi/3$ .

Полученные выражения для условий циркуляции с различными значениями  $\varphi$  применяются при расчёте циркуляторов с широкой полосой рабочих частот. Точки с характерными значениями  $\varphi$  используются как опорные, то есть при расчёте циркуляторов при этих значениях  $\varphi$  на различных частотах в рабочей полосе частот должны выполняться условия циркуляции близкие к идеальным.

### Литература

1. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ: [пер. с англ.]. – М.: Радио и связь, 1981.